

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Departamento de Ingeniería Eléctrica

Grado en Ingeniería Eléctrica

TRABAJO FIN DE GRADO

*“APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO
DE CIMENTACIONES DE APARAMENTA POR EL
MÉTODO SULZBERGER”*

Tutor: Echevarría Cuesta, Ekaitz

Tutor: Hernández, Víctor Julián

Leganés, Septiembre de
2014

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN A SUBESTACIONES	3
1.1. ¿Qué es una subestación eléctrica?	3
1.2. Clasificación	4
1.2.1. Clasificación por función en la red	5
1.2.2. Clasificación según tipo de instalación	6
1.2.3. Clasificación por tipo de aparamenta	8
1.3. Elementos de una subestación	8
1.3.1. Aparamenta y elementos de alta tensión	8
1.3.2. Transformadores de potencia	10
1.3.3. Sistemas de teleprotección y control	11
1.3.4. Sistema de servicios auxiliares	11
1.3.5. Sistema de puesta a tierra	12
2. DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL MÉTODO SULZBERGER	13
2.1. Cimentación tipo bloque de hormigón paralelepípedo rectangular	15
2.1.1. Cálculo del momento de penetración M_s	15
2.1.2. Cálculo del momento en el fondo M_b	21
2.1.3. Cálculo de momento de vuelco M_v	24
3. ANALISIS FUNCIONAL	26
3.1. Apariencia	30
3.2. Variables	33
3.2.1. Variables de entrada	34
3.3. Botones de acción	36
3.3.1. Botón “Resolver”	37
3.3.2. Botón “Borrar datos”	38
3.3.3. Botones “Terminar” y “Fin”	38
3.3.4. Botón Volver a Datos	39
3.4. Tabla de resultados	39

4. MANUAL DE USO	42
4.1. Introducción de datos	42
4.1.1. Fuerzas	43
4.1.2. Dimensiones	44
4.1.3. Datos del terreno y el hormigón	44
4.1.4. Coeficientes	44
4.2. Resolver	45
4.3. Interpretación de datos obtenidos	46
4.3.1. Tabla resultados numéricos	46
4.3.2. Tabla de resultados definitivos	47
4.4. Recalcular	48
4.5. Salir de la aplicación	49
5. DESCRIPCION DE LAS FASES DEL PROYECTO	50
5.1. Repaso del Lenguaje Visual Basic	50
5.2. Estudio del Método Sulzberger	51
5.3. Diseño de la aplicación	51
5.4. Programación	54
5.5. Comprobación y corrección de errores	55
6. PRESUPUESTO	56
6.1. Gastos informáticos	56
6.2. Mano de obra	57
6.3. Presupuesto final	57
7. BIBLIOGRAFIA	58

1. Introducción a subestaciones eléctricas. ^[1]

1.1. ¿Qué es una subestación eléctrica? ^[1]

En toda instalación industrial, comercial, así como doméstica, el uso de la energía eléctrica, la continuidad de servicio y calidad de la energía es imprescindible para la utilización de los diferentes equipos, ya sean industriales o domésticos. Por esto, es requerido contar con una subestación que suministre la energía eléctrica a una potencia y voltaje apropiado. De esta forma podemos definir una subestación eléctrica como una instalación (conjunto de máquinas, aparatos y circuitos) que tiene la función de modificar los parámetros de la potencia eléctrica (tensión y corriente), de la frecuencia, del número de fases o la conexión de dos o más circuitos y de permitir el suministro de la misma al sistema y líneas de transmisión existentes.

Las subestaciones eléctricas pueden encontrarse junto a las centrales eléctricas que se encargan de generar energía o en la periferia de las zonas de consumo, tanto en el exterior como en el interior de los edificios.

Las principales funciones de una subestación son:

- a) Explotación: dirigir el flujo de energía eléctrica de un modo óptimo, minimizando pérdidas y garantizando la fiabilidad y seguridad en el servicio.
- b) Interconexión: es la encargada de unir las diferentes líneas que forman la red eléctrica a los distintos niveles de tensión.
- c) Seguridad: tiene que proteger al sistema eléctrico en caso de que se produzca alguna falta en la red.



Imagen 1. Vista aérea de la subestación eléctrica de una central térmica ^[1].

1.2. Clasificación. ^[1]

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar principalmente de varias formas diferentes. Por un lado podemos clasificar las subestaciones según su función en la red, por otro de acuerdo al tipo de instalación y también podemos clasificarlas según el tipo de aparamenta utilizado en ellas. En el primero de los casos tendremos subestaciones de transformación, que a su vez se dividen en subestaciones elevadoras y subestaciones reductoras, y subestaciones de maniobra. Si las clasificamos según el tipo de instalación tendremos subestaciones de intemperie, subestaciones de interior o subestaciones blindadas.

1.2.1. Clasificación de una subestación según su función en la red.

- a) Subestaciones de maniobra: son las encargadas de conectar dos o más circuitos y realizar sus maniobras. Por lo tanto, en este tipo de subestaciones no se transforma la tensión.
- b) Subestaciones transformadoras: se encargan de transformar la energía eléctrica mediante uno o más transformadores. Estas subestaciones pueden ser elevadoras o reductoras de tensión.
 - b.1) Subestaciones elevadoras: este tipo de subestaciones generalmente se encuentran adyacentes a las centrales generadoras y al aire libre, y permiten modificar los parámetros de la potencia suministrada por los generadores, para permitir la transmisión de la energía eléctrica. Su función es elevar la tensión desde la tensión de generación hasta una tensión adecuada para el transporte de la energía eléctrica. En España la tensión primaria de los transformadores de estas subestaciones suele estar entre 3 y 36kV. Mientras que la tensión secundaria de los transformadores está condicionada por la tensión de la línea de transporte o de interconexión (66, 110, 220 ó 380 kV).
 - b.2) Subestaciones reductoras: estas subestaciones son las encargadas de reducir el nivel tensión de la red desde el nivel de tensión de transporte a muy alta tensión, hasta la tensión de distribución (media tensión). Hay dos tipos subestaciones reductoras, las subestaciones reductoras primarias, y subestaciones reductoras secundarias. Las primeras se alimentan directamente de las líneas de transmisión y reducen la tensión a valores menores según sea el nivel de la transmisión, ya sea para ser usadas en subtransmisión o en distribución, los niveles comunes de tensión de salida de estas subestaciones son de 66 kV y 110 kV. Las subestaciones reductoras secundarias se encuentran alimentadas normalmente por los niveles de tensión intermedios (66 kV, 110 kV) para alimentar a las llamadas redes de distribución de entre 6 y 36 kV.

1.2.2. Clasificación de una subestación según su tipo de instalación.

- a) Subestaciones tipo intemperie: estas subestaciones son aquellas que están construidas para operar a la intemperie y que requieren del uso de máquinas y aparatos adaptados para el funcionamiento en condiciones atmosféricas adversas (lluvia, nieve, viento, contaminación ambiental). Generalmente se usan para sistemas de alta tensión y en una forma muy elemental en las redes de distribución aéreas. Normalmente están ubicadas fuera de los núcleos urbanos.
- b) Subestaciones de tipo interior: las subestaciones que son instaladas en el interior de edificios no se encuentran sujetas a las condiciones de la intemperie, en la actualidad se utilizan en zonas urbanas para ahorrar espacio y reducir la contaminación en las ciudades. Operan con potencias relativamente bajas y se emplean en el interior de industrias o comercios.



Imagen 2. Subestación de interior ^[2].

- c) Subestaciones tipo blindado: en este tipo de subestaciones los aparatos y las máquinas se encuentran completamente blindados y el espacio que ocupan, a igualdad de potencia y tensiones, es muy reducido en comparación con los otros tipos de subestaciones. Esto se consigue gracias a la utilización de hexafluoruro de azufre (SF₆). Generalmente se utilizan en fábricas, hospitales, auditorios, edificios y centros comerciales que requieran poco espacio para su instalación



Imagen 3. Subestación blindada ^[3].

1.2.3. Clasificación de subestaciones según el tipo de aparamenta utilizada.

- a) Subestación convencional: Monta los componentes discretos convencionales conectados entre sí mediante conexiones realizadas in situ. Pueden realizarse en intemperie o interior.
- b) Subestaciones blindadas: Utilizan los componentes integrados y montados en fábrica, protegidos mediante pantallas metálicas y aisladas generalmente mediante gas (SF₆). Pueden realizarse en intemperie o interior.

1.3. Elementos de una subestación. ^[1]

Una subestación eléctrica consta de muchos elementos, y en este apartado vamos a hablar de ellos. Hay cinco elementos principales que constituyen una subestación, y son los siguientes:

- Aparamenta y elementos de alta tensión.
- Transformadores de potencia.
- Sistemas de protección y telecontrol.
- Equipos de servicios auxiliares.
- Sistemas de Puesta a Tierra.

1.3.1. Aparamenta y elementos de alta tensión.

Una subestación está formada por varios circuitos eléctricos conectados a un sistema común de barras. Cada uno de estos circuitos está compuesto por:

- a) Interruptores: son aparatos mecánicos que son capaces de soportar e interrumpir intensidades en condiciones normales de servicio y en condiciones de sobrecarga del servicio, así como soportar corrientes

anormales como las de cortocircuito durante un periodo determinado, aunque no son capaces de interrumpirlas. Existen otros tipos de interruptores que son los interruptores automáticos, estos son elementos mecánicos capaces de establecer, soportar e interrumpir intensidades en condiciones normales de servicio y establecer, soportar durante un tiempo determinado e interrumpir durante un tiempo determinado corrientes tales como las de cortocircuito. Hay varios tipos según el método de extinción del arco como son aceite, aire comprimido, soplado magnético, en vacío y de hexafluoruro de azufre.

- b) Seccionadores: son aparatos mecánicos de corte que aseguran en posición de abierto, una distancia de seccionamiento que satisface unas condiciones especificadas. Establecen un corte visible. Los seccionadores no tienen poder de corte, es decir, pueden abrir y cerrar en tensión, pero no con carga (no pueden extinguir un arco eléctrico), por esto, no es capaz de interrumpir corrientes de cortocircuito. Es un elemento de enclavamiento que evita que se realicen operaciones incorrectas. Existen varios tipos de seccionadores como los de cuchillas giratorias, cuchillas deslizantes, columnas giratorias y de pantógrafo. Normalmente van conectados en serie con un interruptor.



Imagen 4. Seccionadores abiertos en una subestación eléctrica ^[4].

- c) Transformadores de tensión e intensidad: son aparatos que modifican la intensidad y la tensión del circuito, reduciendo sus valores para su medición por parte de los relés de protección.
- d) Autoválvulas: son aparatos que limitan sobretensiones transitorias debidas a descargas atmosféricas o maniobras.

1.3.2. Transformadores de potencia.

Los transformadores de potencia son aquellas maquinas que se encargan de realizar el cambio de tensión. Son aparatos muy caros y pueden llegar a ser de tamaños muy grandes. Están formados por un núcleo de material magnético y varios devanados. Al aplicar una tensión en el devanado primario se produce un flujo magnético en el núcleo de material magnético, que, al circular, provoca una tensión en el secundario que depende de la relación de transformación entre el primario y el secundario. Estos podrán ser trifásicos, monofásicos o bien un banco de transformación, que no es más que tres transformadores monofásicos juntos.



Imagen 5. Autotransformador Siemens de 200MVA ^[5].

1.3.3. Sistemas de protección y telecontrol.

El correcto funcionamiento y seguridad de las instalaciones requiere diseñar circuitos y equipos (alimentados en baja tensión) que permitan realizar funciones de medida, protección, control, enclavamiento, etc. La mayoría de los aparatos de corte empleados en parques intemperie disponen de mando eléctrico y su accionamiento o control se realiza de forma local y/o a distancia, indistintamente.

1.3.4. Equipos de servicios auxiliares.

Para el correcto funcionamiento de la subestación se requiere la existencia de fuentes de alimentación de corriente alterna y corriente continua que alimenten en baja tensión a una serie de equipos necesarios para la explotación correcta de la subestación. Estos equipos son relés de protección, circuitos de control (disparo, cierre, enclavamientos...), motores de accionamiento de interruptores y seccionadores, calefacción y refrigeración de

los equipos y armarios y sector terciario (alumbrado, fuerza,...). En algunas subestaciones existen grupos electrógenos como fuente de alimentación de emergencia en corriente alterna para la alimentación circuitos de servicios auxiliares indispensables, en caso de fallo del suministro normal del cuadro de servicios auxiliares.

1.3.5. Sistemas de puesta a tierra.

En los sistemas eléctricos se pueden producir fallos en los elementos aislantes de las instalaciones, cortocircuitos a tierra en el sistema eléctrico o descargas atmosféricas entre otros fenómenos. La red de puesta a tierra debe drenar las corrientes producidas por estos fenómenos y limitar el campo eléctrico producido.

Sus funciones son mantener la seguridad de las personas conectando a una tierra común todos los elementos metálicos de la instalación que puedan adquirir un potencial elevado ante un fallo de aislamiento, limitar los valores de tensión de paso y de contacto que tendrían lugar en el caso más desfavorable ante una falta y, mediante un diseño adecuado, limitar las diferencias de potencial internas y apantallar los cables auxiliares contra interferencias inductivas.

2. Descripción teórica del método de Sulzberger para el cálculo de cimentaciones.^[2]

El método Sulzberger, inicialmente se aplicó en exclusiva al cálculo de cimentaciones de postes o torres de transmisión de energía eléctrica, pero con el tiempo su utilización se ha extendido a cimentaciones de estructuras de diferentes tipos como estructuras flexibles, realizadas a base de postes, como por ejemplo anuncios de carreteras o antenas de teléfono. Es un método que se adapta particularmente bien a cimentaciones profundas en forma de bloque de hormigón.

La ventaja principal de este tipo de cimentaciones a base de un bloque hormigón reforzado es que se minimiza el espacio, pudiéndose aplicar en casos en los que no es posible colocar una cimentación tradicional a base de dado y zapata aislada reforzada.

El método de Sulzberger se basa en un principio probado experimentalmente, en el que se considera que si tenemos inclinaciones limitadas, de tal forma que la tangente de la cimentación con el terreno sea menor o igual que 0.01 ($\tan \alpha = 0.01$), lo que supone un ángulo de inclinación α máximo de 57° , el suelo tiene un comportamiento elástico. Como consecuencia de esto, se obtienen reacciones en las paredes verticales de la excavación que son normales a la fuerza lateral que actúa sobre el poste, y reacciones verticales en la base del suelo, mediante las cuales se obtiene su resistencia al vuelco. Esto no sucedía en métodos más antiguos como el principio de Mohr, donde se acepta que la reacción a las paredes está producida únicamente por la fricción que aparece durante un esfuerzo vertical del bloque de la cimentación.

En el método Sulzberger se acepta que la profundidad de entrada del bloque de hormigón dentro del terreno depende de la resistencia específica, una de las características del terreno, que se opone a la presión externa del lugar considerado. La resistencia específica, σ , es la presión admisible del suelo y se mide en kg / cm^2 . La presión es igual al producto de la profundidad de entrada y el índice de compresibilidad C . De este modo tenemos:

$$\sigma = \lambda \cdot C \quad [\text{kg}/\text{cm}^2]$$

(1)

Donde: σ Es la presión admisible del suelo en kg / cm^2 .

λ Es la profundidad de entrada del bloque en el suelo en cm.

C Es el índice de compresibilidad del terreno a dos metros de profundidad en kg / cm^3 .

Tras lo mencionado anteriormente, podemos considerar que la resistencia que se opone a la inclinación de la cimentación, es consecuencia de:

- 1) La penetración de la cimentación en el terreno y la fricción entre el bloque y el terreno en las paredes verticales normales a la fuerza actuante.
- 2) La reacción en el fondo de la excavación producida por las cargas verticales que actúan sobre el equipo.

Las reacciones del punto 1 producen un momento resistente llamado momento de penetración M_s , mientras que las del punto 2 producen el momento de fondo M_b .

Con todos estos datos podemos decir que para dimensionar la cimentación tendremos que proponer equilibrio de momentos, de tal forma que la suma de los momentos estabilizadores sea mayor o igual que el momento que produzca el vuelco. De esta forma:

$$M_s + M_b \geq CS \cdot M_v$$

Donde: $M_s + M_b$ Es el momento total resistente al vuelco.

CS Es el coeficiente de seguridad al vuelco.

M_v Es el momento solicitante de vuelco producido por la carga de trabajo.

El método es de carácter general y se puede aplicar a cimentaciones de todo tipo de geometrías, pero las fórmulas que se van a desarrollar en el siguiente apartado están aplicadas a una cimentación en concreto, que es la más usada en la práctica: bloque de hormigón paralelepípedo rectangular.

2.1 Cimentación tipo bloque de hormigón paralelepípedo rectangular.^[2]

2.1.1. Cálculo de momento de penetración M_s .

En un principio, cuando la fuerza que se ejerce sobre un poste no es grande y la fricción en el fondo de la excavación actúa con su valor máximo, el eje de giro del bloque se encuentra en la profundidad t , es decir, está ubicado en la base del bloque (Figura 1).

Si hay una inclinación con un ángulo α , se produce un movimiento transversal de la superficie b , d_y , igual a $y \tan \alpha$, donde b es la dimensión del bloque perpendicular a la fuerza, e y es la distancia de la superficie mencionada hasta el eje.

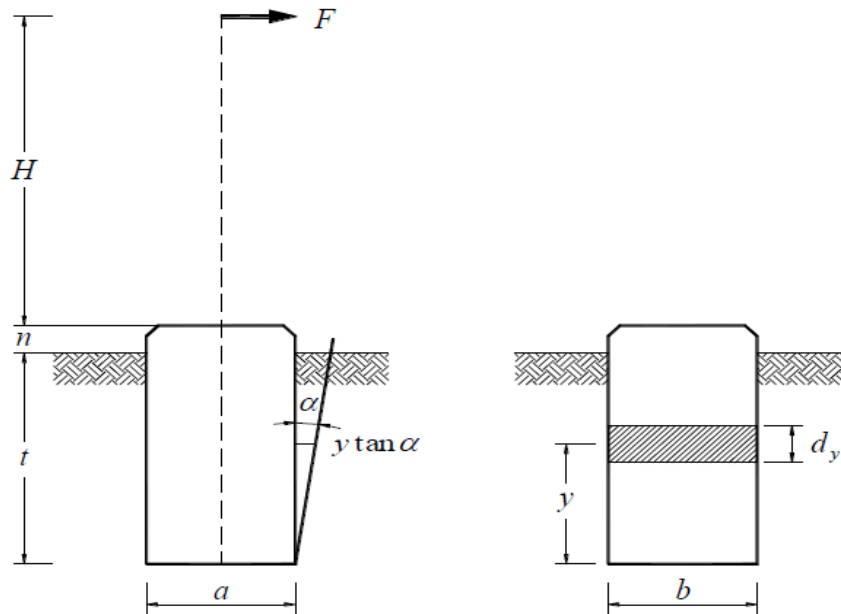


Figura 1

Si consideramos un índice de compresibilidad a la profundidad que estamos considerando C_y , la presión unitaria σ_y será igual a:

$$\sigma_y = C_y \cdot y \tan \alpha \quad [kg/cm^2] \quad (2)$$

Para obtener la fuerza de reacción de la pared sobre el rectángulo infinitesimal, tendremos que multiplicar la presión unitaria σ_y por la superficie del rectángulo. De esta forma la fuerza será:

$$C_y \cdot y \tan \alpha \cdot b d_y \quad [kg] \quad (3)$$

El momento respecto al eje de giro (todavía en la base de la cimentación) estará dado por la expresión:

$$dMs = C_y \cdot y^2 \tan \alpha \cdot b d_y \quad [kg \cdot m] \quad (4)$$

El índice C es una función lineal de la profundidad, por tanto la carga total tendrá forma de triángulo isósceles con la base $C_t b$ y una altura t (Figura 2).

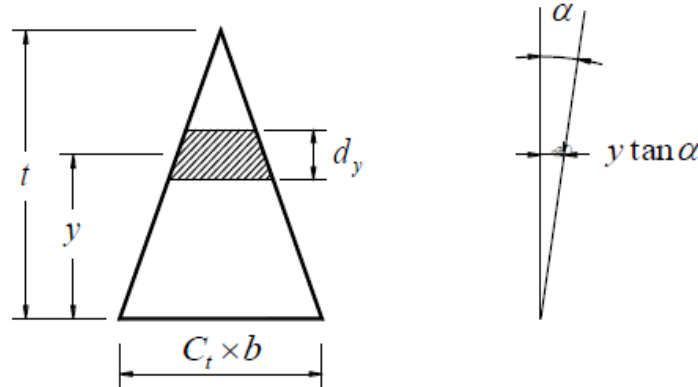


Figura 2

Si el valor de C a la profundidad t la denominamos C_t , tenemos:

$$C = C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right) \quad (5)$$

Si lo sustituimos en (4) e integramos la expresión:

$$M_s = \int_0^t C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right) \cdot y^2 \tan \alpha \cdot b dy$$

$$M_s = \frac{bt^3}{12} \cdot C_t \tan \alpha \quad (6)$$

Para calcular el valor del ángulo que corresponde al momento en que el eje de giro comienza a levantarse desde su posición en el fondo de la excavación, y por tanto el valor máximo, tenemos que la presión unitaria a la profundidad $(t-y)$ es:

$$\sigma_y = \lambda_y \cdot C_y$$

Dónde:

$$C = C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right)$$

$$\lambda_y = y \tan \alpha$$

Si sustituimos:

$$\sigma_y = C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right) y \tan \alpha \quad (7)$$

Siendo σ_y una función parabólica de esfuerzos, simétrica respecto de $y = t/2$ (Figura 3). Si llamamos R , a la resultante de todas las fuerzas resistentes de la pared analizada, podemos escribir:

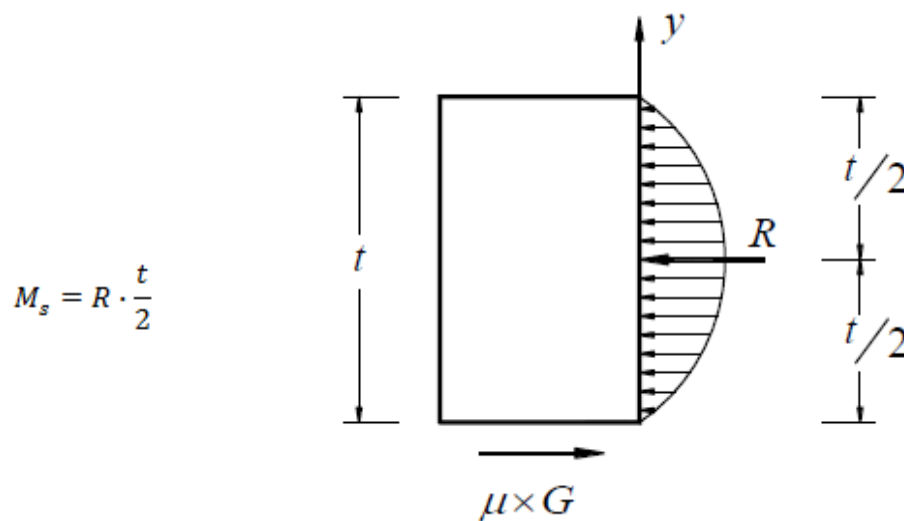


Figura 3

En el momento límite en que el rozamiento es sobrepasado se tiene $R = \mu \times G$, donde G es la resultante de las cargas verticales, y μ es el coeficiente de rozamiento entre bloque y suelo en el fondo de la excavación. En este instante, el eje de giro comienza a levantarse y el ángulo correspondiente se puede calcular por igualdad de momentos del siguiente modo:

$$\mu \cdot G \cdot \frac{t}{2} = \frac{bt^3}{12} \cdot C_t \tan \alpha$$

De aquí despejamos $\tan \alpha$ y obtenemos:

$$\tan \alpha = \frac{6 \cdot \mu \cdot G}{b \cdot C_t \cdot t^2}$$

(8)

Si aumenta el ángulo, disminuye el rozamiento hasta hacerse 0. Así, despreciando el rozamiento en el fondo, se obtiene que el eje de giro se ubica en el centro de gravedad de la superficie de carga, es decir, a una profundidad medida desde la base. Por tanto obtenemos ahora una distribución de presiones en las paredes de la excavación de la forma que se muestra en la figura 4.

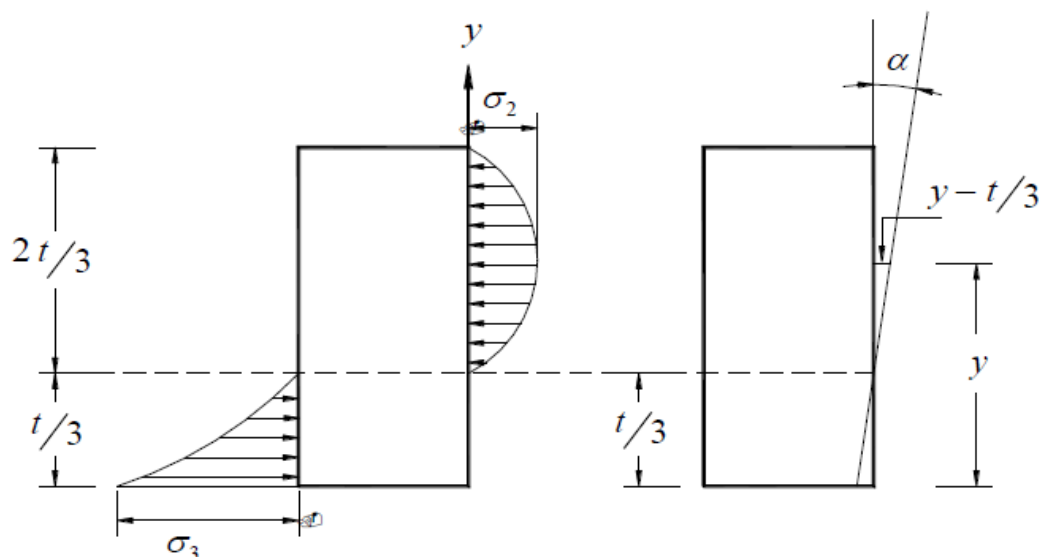


Figura 4

Si repetimos la misma operación que antes, la presión unitaria a la profundidad ($t-y$) es:

$$\sigma_y = \lambda_y \cdot C_y$$

Dónde:

$$C = C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right)$$

$$\lambda_y = \left(y - \frac{t}{3}\right) \tan \alpha$$

Si sustituimos:

$$\sigma_y = C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right) \left(y - \frac{t}{3}\right) \tan \alpha$$

(9)

Los máximos esfuerzos van a ser en:

$$y = \frac{2}{3}t \rightarrow \sigma_2 = C_t \left(\frac{t}{9}\right) \tan \alpha$$

(10)

$$y = 0 \rightarrow \sigma_3 = C_t \left(\frac{t}{3}\right) \tan \alpha$$

(11)

Si la fuerza de reacción en la pared de la excavación es:

$$C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right) \left(y - \frac{t}{3}\right) \tan \alpha \cdot b d_y$$

El momento respecto al eje de giro en la profundidad $y=t/3$ viene dado por:

$$dM_s = C_t \left(1 - \frac{y}{t}\right) \left(y - \frac{t}{3}\right) \tan \alpha \cdot b d_y \cdot \left(y - \frac{t}{3}\right)$$

Si integramos entre 0 y t:

$$M_s = \frac{bt^3}{36} \cdot C_t \tan \alpha$$

2.1.2 Cálculo de momento de fondo M_b .

Para calcular el momento de fondo M_b , tenemos que considerar que las cargas verticales hacen que el bloque penetre en el terreno a una profundidad λ_0 .

$$\lambda_0 = \frac{G}{a \cdot b \cdot C_b} \quad [cm]$$

Donde: G Es la resultante de las fuerzas verticales en kg.

a y b Son las dimensiones de la base del bloque en cm.

C_b Es el índice de compresibilidad en el fondo en kg/cm^3

Si observamos la figura uno, vemos cómo la fuerza F en la punta del poste, provoca una inclinación con un ángulo α , que aumenta la profundidad de entrada en el lado derecho y la disminuye en el izquierdo (Figura 5). Por tanto, la fuerza resultante R en el fondo, por equilibrio de fuerzas, será igual a la suma de los esfuerzos verticales G .

Con esta configuración y cuando la base toca en su totalidad el fondo de la excavación, se tiene una distribución de presiones resultante que se ubica a una distancia v .

$$M_b = G \cdot s = G \left(\frac{a}{2} - v \right)$$

Con:

$$v = \frac{a}{2} - \frac{a\lambda'}{\lambda_0}$$

Si

$$\lambda' = \frac{a}{2} \tan \alpha$$

y

$$\lambda_0 = \frac{G}{a \cdot b \cdot C_b}$$

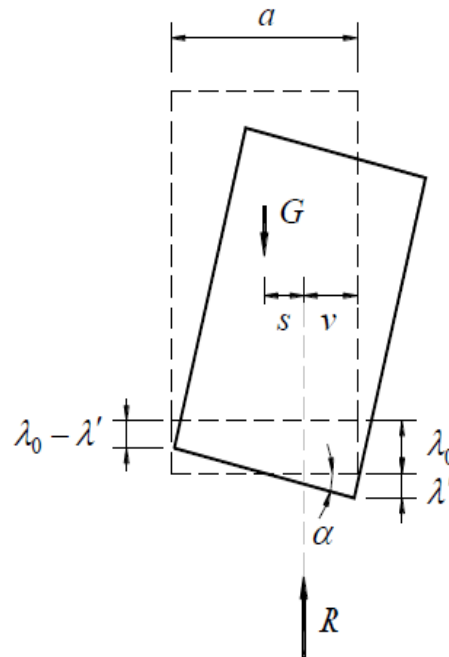


Figura 5

Obtenemos que:

$$M_b = \frac{a^3 \cdot b \cdot C_b \tan \alpha}{12}$$

(12)

Si suponemos la condición $\lambda' = \lambda_0$ podemos calcular el ángulo α de la siguiente forma:

$$a \tan \alpha = 2\lambda_0$$

Si

$$\lambda_0 = \frac{G}{a \cdot b \cdot C_b}$$

$$\tan \alpha = \frac{2G}{a^2 \cdot b \cdot C_b}$$

$$v = \frac{a}{3}$$

Tenemos

$$M_b = \frac{G \cdot a}{6}$$

Si la base se levanta todavía más de tal forma que $\lambda_0 < \lambda'$, y una parte de la superficie deja de estar en contacto, tenemos:

$$M_b = G \left(\frac{a}{2} - \frac{x}{3} \right)$$

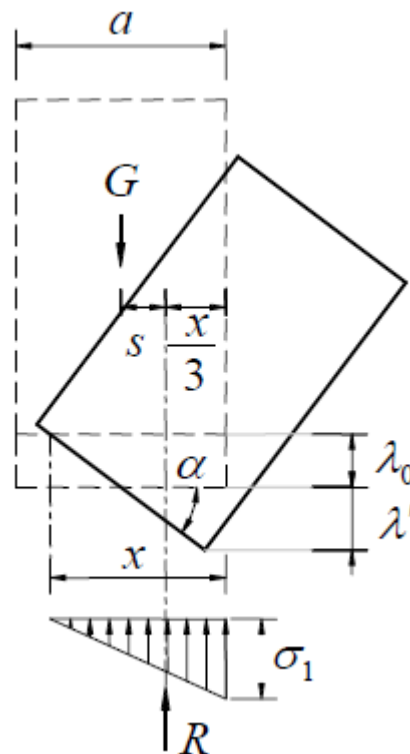


Figura 6

El volumen del prisma de presiones es:

$$G = \sigma_1 \cdot b \cdot \frac{x}{2} \quad (13)$$

Siendo σ_1 el esfuerzo máximo sobre el terreno en el fondo de la excavación, y con un valor:

$$\sigma_1 = C_b \cdot x \cdot \tan \alpha$$

Si sustituimos σ_1 en G , y despejamos el valor de x :

$$x = \sqrt{\frac{2G}{b \cdot C_b \cdot \tan \alpha}} \quad (14)$$

Por tanto, el valor del momento de fondo será:

$$M_b = G \left[\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2G}{b \cdot C_b \cdot \tan \alpha}} \right] \quad (15)$$

2.1.3. Cálculo del momento de vuelco M_v .

El cálculo de este momento es el más sencillo de todos ya que, si tenemos una fuerza en la punta del poste que provoca el vuelco, la ecuación de este momento será igual al producto de la fuerza por la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza al centro de gravedad del bloque. Este centro de gravedad dependerá del ángulo α_1 :

$$M_v = F \cdot (H + t)$$

(16)

$$M_v = F \cdot \left(H + \frac{2t}{3} \right)$$

(17)

Si unimos en una única ecuación los momentos calculados anteriormente obtenemos la ecuación de equilibrio de momentos:

$$F \cdot \left(H + n + \frac{2t}{3} \right) = G \left[\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2G}{b \cdot c_b \cdot \tan \alpha}} \right] + \frac{bt^3}{36} \cdot c_t \tan \alpha$$

(18)

3. Análisis funcional de la aplicación.

La aplicación utiliza el método de Sulzberger para comprobar si una determinada cimentación es válida o no. Para ello realiza dos comprobaciones:

- Comprobación al vuelco.
- Comprobación a la tensión transmitida al terreno.

Para que la cimentación sea correcta, debe cumplir con las dos comprobaciones.

El cálculo del momento lateral M_s , y de la tensión transmitida al terreno por las paredes laterales, depende del ángulo α_1 , de tal modo que las fórmulas que tenemos que utilizar para realizar la comprobación serán diferentes según el valor de la tangente α_1 . De este modo, colocando los ejes coordenados de tal forma que el eje z se ubique en posición vertical, tendremos para el eje x las siguientes formulas.

$$\tan \alpha_1 = \frac{6 \cdot \mu \cdot G}{b \cdot t^2 C_t}$$

Siendo: μ El coeficiente de rozamiento entre el terreno y el hormigón.

G La resultante de las fuerzas verticales [kg].

b La dimensión de la base de la zapata perpendicular al eje x [m].

t El canto de la zapata [m].

C_t El coeficiente de compresibilidad a la profundidad t [kg/m³].

Si el valor de la tangente es superior a 0.01 utilizamos:

$$M_s = \frac{bt^3}{12} \cdot C_t \tan \alpha$$

$$M_v = F_x \cdot (H + t)$$

$$\sigma_{ym\acute{a}x} = C_t \left(\frac{t}{3} \right) \tan \alpha$$

Donde: F_x Es la fuerza resultante en el eje x en kilogramos [kg].

$\tan \alpha$ Es el valor límite 0.01.

H Es la altura del equipo [m].

b La dimensión de la base de la zapata perpendicular al eje x [m].

t El canto de la zapata [m].

C_t El coeficiente de compresibilidad a la profundidad t [kg/m^3].

Si por el contrario el valor de la tangente es inferior a 0.01:

$$M_s = \frac{bt^3}{36} \cdot C_t \tan \alpha$$

$$M_v = F_x \cdot \left(H + \frac{2}{3}t \right)$$

$$\sigma_{ym\acute{a}x} = C_t \left(\frac{t}{9} \right) \tan \alpha$$

Donde: F_x Es la fuerza resultante en el eje x [kg].

$\tan \alpha$ Es el valor límite 0.01.

H Es la altura del equipo en metros [m].

b La dimensión de la base de la zapata perpendicular al eje x [m].

t El canto de la zapata [m].

C_t El coeficiente de compresibilidad a la profundidad t [kg/m³].

El cálculo del momento en el fondo M_b , y de la tensión transmitida al terreno por la base de la cimentación, depende del ángulo α_2 , del mismo modo que antes, las fórmulas que tenemos que utilizar para realizar la comprobación serán diferentes según el valor de la tangente α_2 . De este modo colocando los ejes coordenados de tal modo que el eje z se ubique en posición vertical, tendremos para el eje x las siguientes formulas.

$$\tan \alpha_2 = \frac{2G}{a^2 \cdot b \cdot C_b}$$

Donde: G Es la fuerza resultante en el eje z en [kg].

b La dimensión de la base de la zapata perpendicular al eje x [m].

a La dimensión de la base de la zapata paralela al eje x [m].

C_b El coeficiente de compresibilidad en la base [kg/m³].

Si obtenemos un valor de la tangente superior a 0.01 usaremos:

$$M_b = \frac{a^3 \cdot b \cdot C_b \tan \alpha}{12}$$

$$\sigma_{bm\acute{a}x} = \frac{G}{a \cdot b} + C_b \frac{a}{2} \tan \alpha$$

Donde: G Es la fuerza resultante en el eje z [kg].

b La dimensi3n de la base de la zapata perpendicular al eje x [m].

a La dimensi3n de la base de la zapata paralela al eje x [m].

C_b El coeficiente de compresibilidad en la base [kg/m³].

tan α Es el valor l3mite 0.01.

Por otro lado si el valor de la tangente es inferior a 0.01:

$$M_b = G \left[\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2G}{b \cdot C_b \cdot \tan \alpha}} \right]$$

$$\sigma_{bm\acute{a}x} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot C_b \cdot \tan \alpha}{b}}$$

- Donde:
- G Es la fuerza resultante en el eje z [kg].
 - b La dimensión de la base de la zapata perpendicular al eje x [m].
 - a La dimensión de la base de la zapata paralela al eje x [m].
 - C_b El coeficiente de compresibilidad en la base [kg/m³].
 - tan α Es el valor límite 0.01.

Para que la cimentación sea válida deberá cumplir:

$$M_s + M_b > M_v$$

$$\sigma_{admi} > \sigma_{ym\acute{a}x}$$

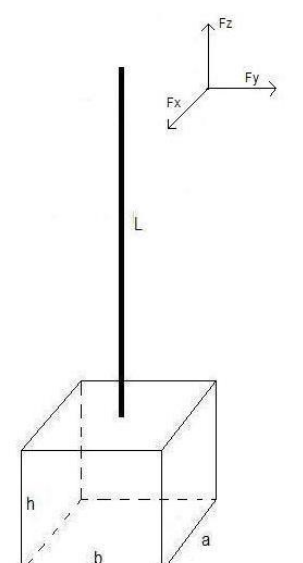
$$\sigma_{admi} > \sigma_{bm\acute{a}x}$$

La aplicación realizará seis comprobaciones diferentes para seis hipótesis de cálculo diferentes. Estas hipótesis se corresponden con situaciones reales de servicio.

3.1. Apariencia.

La aplicación está programada en Visual Basic, y consta principalmente de dos formularios. El primero es el formulario que aparece nada más abrir la aplicación (Imagen 6). Es el formulario de introducción de datos por parte del usuario. En él se van a introducir todos los datos necesarios para calcular si la cimentación es válida o no, bajo unas hipótesis determinadas de esfuerzos.

Cálculo de cimentaciones por el método de Sulzberger



Esfuerzos que actúan sobre el equipo [kg]

	Fx	Fy	Fz
C1- Peso Propio	0	0	1
C2- Tiro de cables	1	1	0
C3- Viento permanente	1	1	0
C4- Viento excepcional	1	1	0
C5- Hielo	0	0	1
C6- Sismo	1	1	0
C7- Cortocircuito	1	1	0
C8- Operación	1	1	0

Altura de aplicación [m]

La altura máxima es L

	Altura [m]
C1- Peso Propio	L
C2- Tiro de cables	L
C3- Viento permanente	L
C4- Viento excepcional	L
C5- Hielo	L
C6- Sismo	L
C7- Cortocircuito	L
C8- Operación	L

Dimensiones [metros]

Altura del equipo (L)

Alto (h)

Profundo (a)

Ancho (b)

Datos del terreno y hormigón

Densidad hormigón [kg/cm³]

Presión admisible del terreno [kg/m²]

Índice de compresibilidad [kg/m³]

Coefficiente de rozamiento entre suelo y zapata

Hipótesis de cálculo

H1- Situación permanente

H2- Viento excepcional

H3- Hielo + viento permanente

H4- Sismo

H5- Cortocircuito

H6- Operación

Coefficientes de mayorización

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
H1- Situación permanente	1	1	1	0	0	0	0	0
H2- Viento excepcional	1	1	0	1	0	0	0	0
H3- Hielo + viento permanente	1	1	1	0	1	0	0	0
H4- Sismo	1	1	1	0	0	1	0	0
H5- Cortocircuito	1	1	1	0	0	0	1	0
H6- Operación	1	1	1	0	0	0	0	1

Borrar datos

Resolver

Terminar

Imagen 6. Formulario introducción de datos.

El segundo formulario es el formulario que nos indica el resultado según las diferentes comprobaciones e hipótesis (imagen 7).

Resultado Sulzberger

		Vuelco $M_s + M_b \geq M_v$						Presión admisible del terreno $\sigma_{bm\acute{a}x} < \sigma_{admi}$ $\sigma_{ym\acute{a}x} < \sigma_{admi}$					
Eje	Hip.	$\tan \alpha_1$	$\tan \alpha_2$	M_v [kg-m]	M_s [kg-m]	M_b [kg-m]	CS	APTO	σ_b [kg/cm ²]	CS_b	σ_y [kg/cm ²]	CS_y	APTO
Eje X	H1	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,3184	0,55555	3,59353	SI
	H2	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H3	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,113	SI	1,51690	1,31818	0,55555	3,59353	SI
	H4	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,848	461,385	SI	1,51723	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H5	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H6	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
Eje Y	H1	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H2	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H3	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,848	692,113	SI	1,51690	1,31818	0,55555	3,59353	SI
	H4	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51723	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H5	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H6	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI

Hipótesis de cálculo	Resultado
H1- Situación Permanente	APTO
H2- Viento Excepcional	APTO
H3- Hielo + Viento pte	APTO
H4- Sismo	APTO
H5- Cortocircuito	APTO
H6- Operación	APTO

Volver a Datos Salir

Imagen 7. Formulario de resultado.

El formulario de introducción de datos está compuesto por:

- Una imagen que representa los ejes cartesianos y una figura de un bloque de hormigón y un equipo, que sirve como guía para la introducción de datos.
- Una tabla de introducción de fuerzas que únicamente permite la introducción de datos numéricos. En estos cuadros de texto hay que introducir el valor de las diferentes fuerzas en kilogramos.
- Cuatro cuadros de texto para introducir las dimensiones en metros, de la altura del equipo y las dimensiones del bloque de hormigón que queremos comprobar. Estos cuadros, igual que los anteriores, solo permiten la introducción de números.
- Cuatro cuadros de texto cuya función es introducir la compresibilidad del

terreno, la tensión máxima admisible, el coeficiente de rozamiento entre hormigón y suelo y la densidad del hormigón que se va a utilizar para la cimentación.

- e) Una tabla de introducción de coeficientes para mayorar los esfuerzos introducidos en la primera tabla. Únicamente se pueden introducir datos numéricos.
- f) Tres botones de acción. Estos botones sirven para borrar todo lo escrito en los cuadros de texto, para salir de la aplicación y, el más importante de todos, para resolver la configuración dada.

El segundo formulario consta de dos tablas. En la primera de ellas aparecerán los valores numéricos de los cálculos realizados (M_s , M_v , M_b , las tensiones transmitidas y coeficientes de seguridad). En esta tabla se puede ver cada hipótesis de cálculo por separado. La segunda tabla que aparece es la tabla de resultado, y nos indica si la cimentación es apta, o no apta, de manera global para cada una de las hipótesis

3.2. Variables.

Para el correcto funcionamiento de la aplicación, y que esta pueda realizar los cálculos necesarios, la aplicación trabaja con doscientas treinta y tres variables, todas ellas declaradas como variables públicas para poder acceder desde diferentes formularios. Pero no todas las variables son datos de entrada, algunas tienen un valor fijo predeterminado, otras oscilan entre unos valores obtenidos a través de tablas, otras son combinaciones de variables y algunas son datos de entrada. A continuación vamos a hablar acerca de las variables.

3.2.1. Datos de entrada.

Los datos de entrada son las variables que tiene que introducir el usuario, por este motivo vamos a pararnos de forma detallada en ellas. Son variables de tipo single numéricas a través de las cajas de texto del formulario de datos. A cada dato introducido le corresponde una variable y a partir de estos datos se van a calcular el resto de variables necesarias para el cálculo de la cimentación. Son las siguientes.

- Las variables de fuerza. Consideramos ocho tipos de fuerzas en los ejes coordenados x, y, z.
- Altura de aplicación de las fuerzas en el eje z.

	Esfuerzos que actúan sobre el equipo [kg]			Altura de aplicación [m]
	F _x	F _y	F _z	La altura máxima es L
C1- Peso Propio	0	0	1	L
C2- Tiro de cables	1	1	0	L
C3- Viento permanente	1	1	0	L
C4- Viento excepcional	1	1	0	L
C5- Hielo	0	0	1	L
C6- Sismo	1	1	0	L
C7- Cortocircuito	1	1	0	L
C8- Operación	1	1	0	L

Imagen 8. Introducción de fuerzas.

- Dimensiones del equipo y la zapata.
- Propiedades del hormigón y del terreno.

Dimensiones [metros]

Altura del equipo (L)

1

Alto (h)

1

Profundo (a)

1

Ancho (b)

1

Datos del terreno y hormigón

Densidad hormigon [kg/cm²]

2300

Presión admisible del terreno [kg/m²]

2

Indice de compresibilidad [kg/m³]

10

Coefficiente de rozamiento entre suelo y zapata

0.5

Imagen 9. Dimensiones y datos de terreno

- Coeficientes de mayoración de las fuerzas.

Hipótesis de cálculo	Coeficientes de mayorización							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
H1- Situación permanente	1	1	1	0	0	0	0	0
H2- Viento excepcional	1	1	0	1	0	0	0	0
H3- Hielo + viento permanente	1	1	1	0	1	0	0	0
H4- Sismo	1	1	1	0	0	1	0	0
H5- Cortocircuito	1	1	1	0	0	0	1	0
H6- Operación	1	1	1	0	0	0	0	1

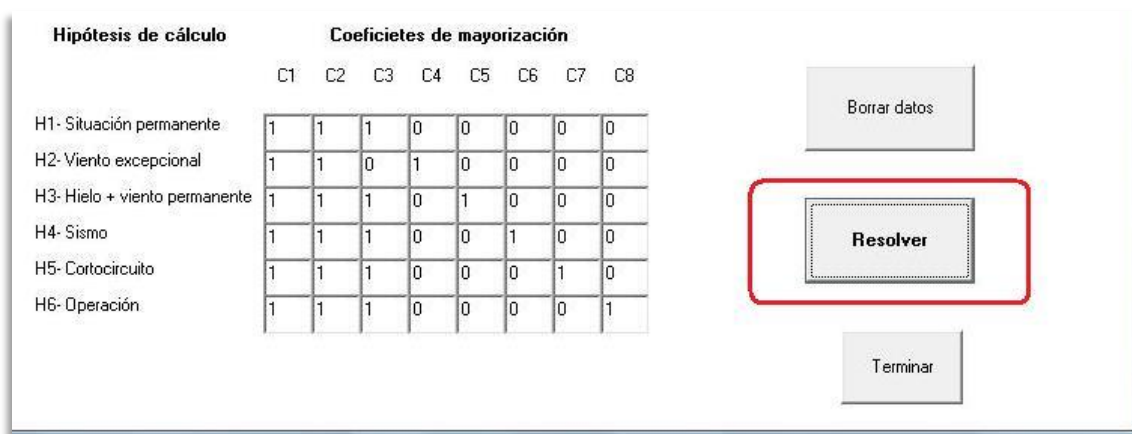
Imagen 10. Tabla de coeficientes.

3.3. Botones de acción.

Estos botones, distribuidos en los dos formularios, son los que realmente realizan las acciones necesarias. El botón más importante es el botón “Resolver”, ya que es el encargado de ordenar al programa realizar los cálculos necesarios. A continuación vamos a desarrollar las funciones de los diferentes botones.

3.3.1. Botón “Resolver”.

Este botón está ubicado en el formulario de datos, que es el primero que aparece cuando abrimos la aplicación. Es el elemento de la aplicación que tiene más funciones ya que al pulsarlo estamos ordenando a la aplicación que lea las variables de entrada, que calcule todas las variables necesarias y las compare para ver si es válida o no, y mande los resultados al formulario de resultados.



Hipótesis de cálculo	Coeficientes de mayorización							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
H1- Situación permanente	1	1	1	0	0	0	0	0
H2- Viento excepcional	1	1	0	1	0	0	0	0
H3- Hielo + viento permanente	1	1	1	0	1	0	0	0
H4- Sismo	1	1	1	0	0	1	0	0
H5- Cortocircuito	1	1	1	0	0	0	1	0
H6- Operación	1	1	1	0	0	0	0	1

Buttons: Borrar datos, **Resolver**, Terminar

Imagen 11. Botón Resolver.

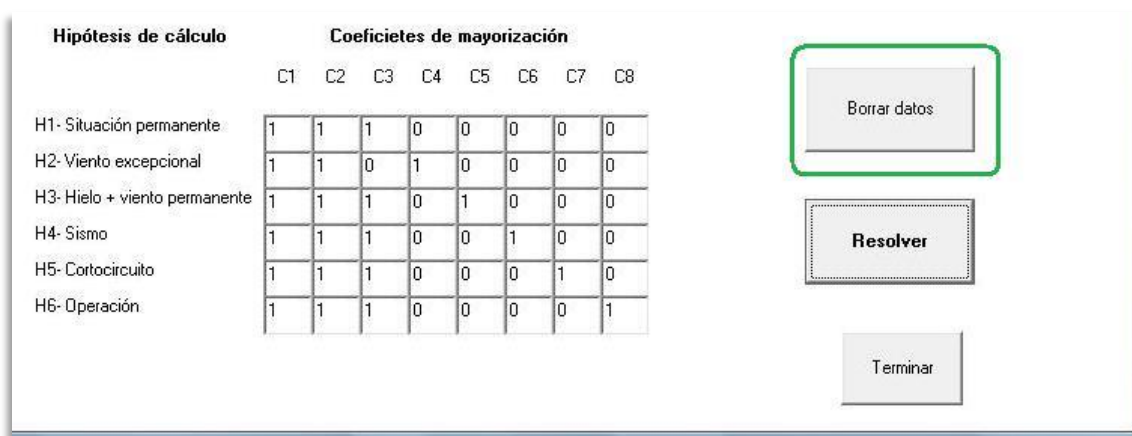
La primera de sus funciones es leer los datos introducidos por el usuario y asignarlos a sus variables. La aplicación lee los valores de las variables que se han introducido en las cajas de texto y las almacena.

Después, a partir de esas variables, calcula todas las variables vistas en el apartado anterior utilizando la teoría del método de Sulzberger, y comienza a comprobar si el resultado es adecuado.

Para finalizar, modifica el estado del formulario de resultado, a raíz de los calculados que ha realizado, mostrando en él todos los resultados obtenidos en la pantalla.

3.3.2. Botón “Borrar datos”.

Este botón se encarga de borrar todos los datos introducidos por el usuario en las cajas de texto. Su función es hacer más cómoda la modificación de los datos.



The screenshot shows a web application interface. On the left, there is a table with the title 'Hipótesis de cálculo' and 'Coeficientes de mayorización'. The table has 6 rows (H1 to H6) and 8 columns (C1 to C8). The data in the table is as follows:

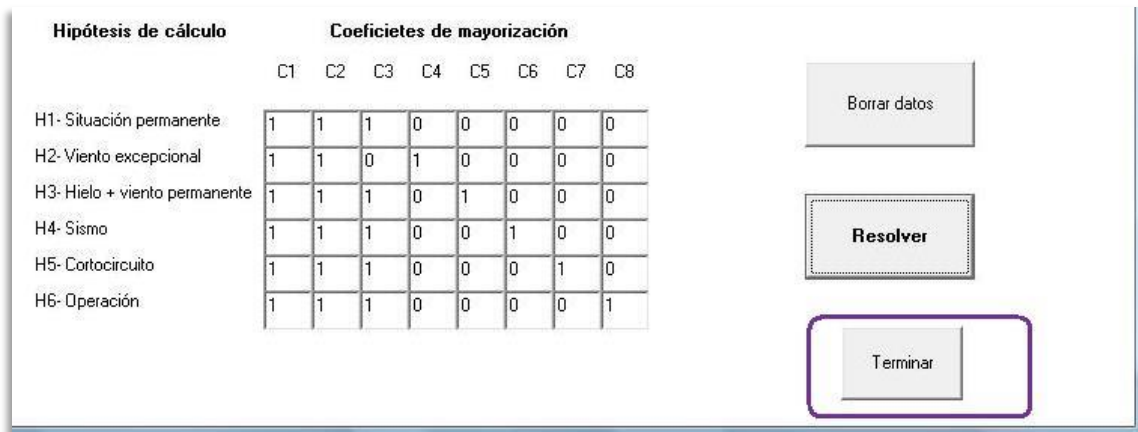
Hipótesis de cálculo	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
H1- Situación permanente	1	1	1	0	0	0	0	0
H2- Viento excepcional	1	1	0	1	0	0	0	0
H3- Hielo + viento permanente	1	1	1	0	1	0	0	0
H4- Sismo	1	1	1	0	0	1	0	0
H5- Cortocircuito	1	1	1	0	0	0	1	0
H6- Operación	1	1	1	0	0	0	0	1

On the right side of the interface, there are three buttons: 'Borrar datos' (highlighted with a green border), 'Resolver', and 'Terminar'.

Imagen 12. Botón Borrar datos.

3.3.3. Botón “Terminar” y botón “Fin”.

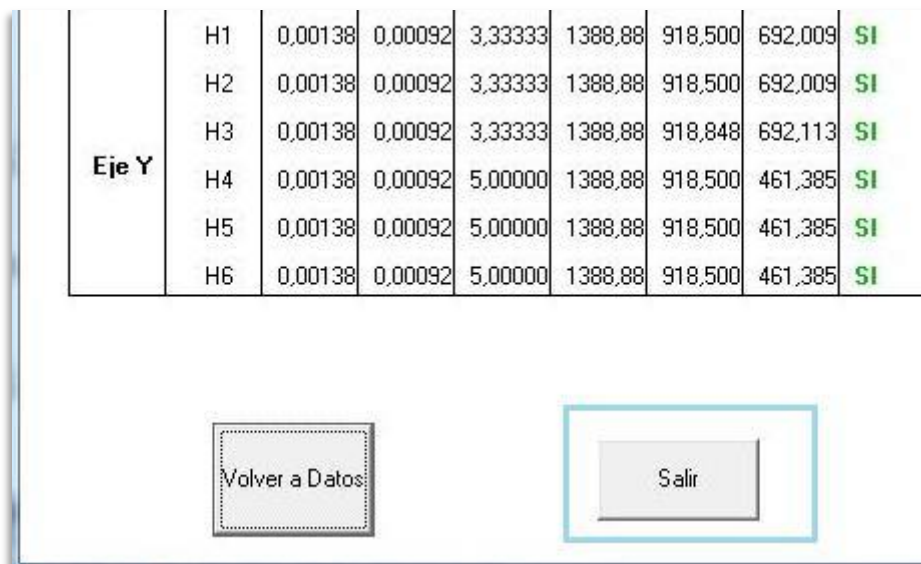
La función de estos dos botones es la misma, y cada uno la ejerce en sus respectivos formularios. Su función es cerrar la aplicación por completo. En ese caso todos los datos introducidos quedarán borrados y en caso de que queramos volver a utilizar la aplicación abra que comenzar de cero.



The screenshot shows a web application interface. On the left, under the heading 'Hipótesis de cálculo', there is a table with 6 rows (H1-H6) and 8 columns (C1-C8). The table contains binary values (0 or 1). To the right of the table are three buttons: 'Borrar datos', 'Resolver', and 'Terminar'. The 'Terminar' button is highlighted with a red rectangular border.

Hipótesis de cálculo	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
H1- Situación permanente	1	1	1	0	0	0	0	0
H2- Viento excepcional	1	1	0	1	0	0	0	0
H3- Hielo + viento permanente	1	1	1	0	1	0	0	0
H4- Sismo	1	1	1	0	0	1	0	0
H5- Cortocircuito	1	1	1	0	0	0	1	0
H6- Operación	1	1	1	0	0	0	0	1

Imagen 13. Botón Terminar.



The screenshot shows a web application interface displaying a table of results. The table has 9 columns. The first column is labeled 'Eje Y' and contains values H1 through H6. The subsequent columns contain numerical values. The last column contains values in green text: 'SI', 'SI', 'SI', 'SI', 'SI', 'SI'. Below the table are two buttons: 'Volver a Datos' and 'Salir'. The 'Salir' button is highlighted with a red rectangular border.

Eje Y	H1	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI
H2	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	
H3	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,848	692,113	SI	
H4	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	
H5	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	
H6	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	

Imagen 14. Botón Salir.

3.3.3. Botón “Volver a datos”.

Este botón aparece en el segundo formulario y su función es la de llevarnos de nuevo al formulario de introducción de datos.

Eje Y	H1	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692
	H2	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692
	H3	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,848	692
	H4	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461
	H5	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461
	H6	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461




Imagen 15. Botón Volver a datos.

3.4. Tablas de resultados.

Las tablas de resultados aparecen en el formulario resultado, tras pulsar el botón “Resolver”. Ocupan prácticamente la totalidad del formulario y en ellas se reflejan los resultados que la aplicación ha calculado. Muestra un total de ciento cincuenta salidas.

La primera tabla de resultados nos muestra uno por uno para cada hipótesis de cálculo, todos los resultados obtenidos para los momentos producidos y las tensiones transmitidas así como los coeficientes de seguridad.

La segunda tabla muestra el resultado definitivo, sin aportar datos. En caso de que las hipótesis de cálculo sean válidas para una comprobación determinada muestra dos salidas: “Apto”, que indica que es válido, y el coeficiente de seguridad. En caso negativo muestra la salida “No apto”.

Resultado Sulzberger													
				Vuelco $M_s + M_b \geq M_v$					Presión admisible del terreno $\sigma_{bm\acute{a}x} < \sigma_{admi}$ $\sigma_{ym\acute{a}x} < \sigma_{admi}$				
Eje	Hip.	$\tan \alpha_1$	$\tan \alpha_2$	M_v [kg·m]	M_s [kg·m]	M_b [kg·m]	CS	APTO	σ_b [kg/cm ²]	CS_b	σ_y [kg/cm ²]	CS_y	APTO
Eje X	H1	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,3184	0,55555	3,59353	SI
	H2	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H3	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,113	SI	1,51690	1,31818	0,55555	3,59353	SI
	H4	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,848	461,385	SI	1,51723	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H5	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H6	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
Eje Y	H1	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H2	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,500	692,009	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H3	0,00138	0,00092	3,33333	1388,88	918,848	692,113	SI	1,51690	1,31818	0,55555	3,59353	SI
	H4	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51723	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H5	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI
	H6	0,00138	0,00092	5,00000	1388,88	918,500	461,385	SI	1,51690	1,31847	0,55555	3,59353	SI

Imagen 15. Tabla de resultados.

Hipótesis de cálculo	Resultado
H1- Situación Permanente	APTO
H2- Viento Excepcional	APTO
H3- Hielo + Viento pte	APTO
H4- Sismo	APTO
H5- Cortocircuito	APTO
H6- Operación	APTO

Imagen 16. Tabla de resultados.

4. Manual de uso de la aplicación.

La aplicación está programada para que el usuario únicamente tenga que introducir los datos y pulsar un botón, pero para entender los resultados que salen en pantalla e introducir correctamente los datos hay que seguir unos pasos determinados.

4.1. Introducción de datos.

Al abrir la aplicación aparecerá el formulario de introducción de datos. En él debemos introducir todos los datos necesarios para que el programa realice los cálculos necesarios.

Para introducir todos estos datos es necesario saber que:

- a) Las cajas de texto solo admiten caracteres numéricos y puntos.
- b) Al intentar introducir un carácter que no sea un número o un punto, no ocurrirá nada.
- c) Permite introducir más de un punto en la misma caja de texto, pero nada de lo que vaya a la derecha del segundo punto (éste incluido), será utilizado por el programa.
- d) El primer término de una caja de texto no puede ser un punto, en ese caso la aplicación no es capaz de almacenar esa variable y obtendremos un error.

4.1.1. Fuerzas.

El programa considera ocho fuerzas que actúan sobre el equipo en los tres ejes coordinados, estas fuerzas deben ser introducidas en kilogramos. Las ocho fuerzas a introducir son:

- Peso propio.
- Tiro de cables.
- Viento permanente.
- Viento excepcional.
- Hielo.
- Cortocircuito.
- Sismo.
- Operación.

Para introducir los datos es necesario saber que si se deja un valor en blanco se le asigna por defecto el valor 0.

Cada fuerza tiene un punto de aplicación que por defecto será la altura máxima del equipo, pero que se puede modificar. Para modificar esa altura es necesario saber que:

- Si en la altura de aplicación aparece el término “L”, el punto de aplicación será el más alto del equipo.
- Si aparece un valor superior a la altura del equipo, el punto de aplicación de la fuerza será la altura total del equipo.
- Si aparece un valor entre 0 y L, el punto de aplicación será ese valor.

- Si aparece vacío el programa le asigna el valor 0.
- El valor debe introducirse en metros.

4.1.2. Dimensiones.

Para calcular si la cimentación es válida, el programa necesita tener las dimensiones del bloque de hormigón, y la altura del equipo. La unidad de las dimensiones es el metro. En caso de que alguno de los cuadros de texto de las dimensiones este vacío o tenga valor 0, se le asigna por defecto el valor 0.001.

4.1.3. Datos del terreno y hormigón.

La validez, o no, de la cimentación depende también del tipo de terreno y del hormigón que se utilice. Los datos necesarios son:

- Densidad del hormigón en kilogramos partido metro cúbico.
- Compresibilidad del terreno en kilogramos partido centímetro cubico.
- Tensión admisible del terreno en kilogramo partido centímetro cuadrado.
- Coeficiente de rozamiento entre hormigón y suelo.

La aplicación por defecto tiene unos valores asignados para terreno y hormigón normales.

4.1.4. Coeficientes.

Los coeficientes son utilizados para mayorar los esfuerzos que va a sufrir el equipo durante su servicio. Se debe introducir un coeficiente para cada fuerza en cada hipótesis de cálculo. En caso de que una caja de texto de coeficientes este vacía se le asignara el valor 0.

ger

	Esfuerzos que actúan sobre el equipo [kg]			Altura de aplicación [m]	Dimensiones [metros]
	Fx	Fy	Fz	La altura máxima es L	
C1- Peso Propio	0	0	400	L	Altura del equipo (L) 5
C2- Tiro de cables	250	50	0	L	Alto (h) 0.55
C3- Viento permanente	0	50	0	L	Profundo (a) 2.3
C4- Viento excepcional	300	1	0	3	Ancho (b) 1.2
C5- Hielo	0	0	100	L	
C6- Sismo	200	200	0	L	
C7- Cortocircuito	0	0	0	L	
C8- Operación	100	100	0	L	

Datos del terreno y hormigón	
Densidad hormigon [kg/cm ²]	2300
Presión admisible del terreno [kg/m ²]	2
Índice de compresibilidad [kg/m ³]	10
Coefficiente de rozamiento entre suelo y zapata	0.3

Hipótesis de cálculo	Coeficientes de mayorización							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
H1- Situación permanente	2	2	2	0	0	0	0	0
H2- Viento excepcional	1.5	2	0	1	0	0	0	0
H3- Hielo + viento permanente	1.5	3	3	0	1.4	0	0	0
H4- Sismo	1.2	1.5	1.3	0	0	1	0	0
H5- Cortocircuito	1.2	1.2	1.3	0	0	0	1.2	0
H6- Operación	1	1	1	0	0	0	0	2

Borrar datos

Resolver

Terminar

Imagen17. Ejemplo introducción de datos.

4.2. Resolver.

Una vez introducidos todos los datos deseados, será suficiente con pulsar el botón "Resolver". Al realizar esta acción se iniciará el segundo formulario con la solución de nuestra cimentación.

4.3. Interpretación de datos obtenidos.

4.3.1. Tabla de resultados numéricos.

En esta tabla aparecen los datos numéricos de los cálculos realizados. Está compuesta por doce columnas de resultado, de las cuales diez son de carácter numérico. Las dos restantes entregan la salida “SI” o “NO” en función de si es apto o no para el vuelco y la tensión transmitida al terreno. Las columnas numéricas son:

- Tangentes α_1 y α_2 . Las dos primeras nos indican si el resultado del cálculo de la tangente es mayor o menor que 0.01, para saber las fórmulas que se han utilizado.
- Momento lateral, momento de fondo y momento de vuelco. Son tres columnas que nos muestran el valor calculado para los momentos en kilogramos por metro.
- Coeficiente de seguridad al vuelco. Aparece un valor numérico que es el coeficiente de seguridad al vuelco, la tensión transmitida a las paredes laterales del terreno y a la tensión transmitida al fondo.
- Tensión de fondo y tensión lateral. Muestran el valor calculado de la tensión transmitida a las paredes laterales y al fondo en kilogramos partido centímetro cuadrado.

				Vuelco $M_s + M_b \geq M_v$					Presión admisible del terreno $\sigma_{bm\acute{a}x} < \sigma_{admi} \quad \sigma_{ym\acute{a}x} < \sigma_{admi}$				
Eje	Hip.	$\tan \alpha_1$	$\tan \alpha_2$	M_v [kg·m]	M_s [kg·m]	M_b [kg·m]	CS	APTO	σ_b [kg/cm ²]	CS _b	σ_y [kg/cm ²]	CS _y	APTO
Eje X	H1	< 0.01	< 0.01	3683,33	152,510	3847,05	1,08585	SI	1,33549	0,7487	0,16805	5,91521	NO
	H2	< 0.01	< 0.01	4693,33	152,510	3847,05	0,85217	NO	1,33549	0,74878	0,16805	5,91521	NO
	H3	< 0.01	< 0.01	5525,00	152,510	3847,05	0,74685	SI	1,33549	0,73566	0,16805	5,91521	NO
	H4	< 0.01	< 0.01	4235,83	152,510	3973,85	0,94422	NO	1,35931	0,74878	0,16805	5,91521	NO
	H5	< 0.01	< 0.01	2210,00	152,510	3847,05	1,80975	SI	1,33549	0,74878	0,16805	5,91521	NO
	H6	< 0.01	< 0.01	3315,00	152,510	3847,05	1,20650	SI	1,33549	0,74878	0,16805	5,91521	NO
Eje Y	H1	< 0.01	< 0.01	1473,33	292,311	1881,18	1,47522	SI	0,96465	1,03664	0,16805	5,91521	SI
	H2	< 0.01	< 0.01	740,033	292,311	1881,18	2,93702	SI	0,96465	1,03664	0,16805	5,91521	SI
	H3	< 0.01	< 0.01	2210,00	292,311	1940,48	1,01031	SI	0,96465	1,01848	0,16805	5,91521	SI
	H4	< 0.01	< 0.01	2504,66	292,311	1881,18	0,86777	NO	0,98185	1,03664	0,16805	5,91521	SI
	H5	< 0.01	< 0.01	920,833	292,311	1881,18	2,36035	SI	0,96465	1,03664	0,16805	5,91521	SI
	H6	< 0.01	< 0.01	2210,00	292,311	1881,18	0,98348	NO	0,96465	1,03664	0,16805	5,91521	SI

Imagen 18. Ejemplo de resultados numéricos.

4.3.2. Tabla de resultados definitivos

Los datos obtenidos que figuraran en esta tabla son resultados definitivos y nos dan una información muy concreta de los resultados. Se obtendrán dos posibles soluciones para cada una de las comprobaciones:

- No apto→Aparecerá en color rojo el mensaje “No apto” y significa que esa configuración no es válida en esa hipótesis de cálculo.
- Apto→Aparecerá en color verde el mensaje “Apto”. Significa que esa configuración es adecuada para esa hipótesis.

Hipótesis de cálculo	Resultado
H1- Situación Permanente	APTO
H2- Viento Excepcional	NO APTO
H3- Hielo + Viento pte	NO APTO
H4- Sismo	NO APTO
H5- Cortocircuito	APTO
H6- Operación	NO APTO

Imagen 19. Ejemplo de Resultados.

4.4. Recalcular.

Para cambiar algún dato o cambiar la configuración completa hay que pulsar el botón “Volver a datos”, volverá a aparecer el primer formulario con todos los datos que hemos introducido anteriormente. Llegados a este punto hay dos opciones:

- Pulsar el botón llamado “Borrar datos”. Esto borrará todos los datos ya introducidos en las cajas de texto y lo dejará como cuando fue abierto.
- Modificar los datos deseados uno por uno. Esta modificación se realiza como una introducción de datos normal.

4.5. Salir de la aplicación.

Para salir de la aplicación existe un botón en cada formulario que cierra la aplicación. Ambos ubicados en el lado inferior derecho de los formularios. En el formulario de datos se llama “Terminar” y en el formulario resultado se denomina “Fin”.

Hay otro modo de cerrar la aplicación. Se puede cerrar como cualquier otra ventana o carpeta pulsando la cruz de la esquina superior derecha. De esta forma únicamente se cierra el formulario en el que se pulsa esta cruz.

Al cerrar cualquiera de los formularios, o los dos, los datos introducidos en ellos serán borrados automáticamente.

5. Descripción de las fases del proyecto.

Este proyecto comenzó con su asignación, por parte del profesor Víctor Julián Hernández, a mi persona, Ekaitz Echevarría el 30 de Enero de 2014 y continuó con las siguientes fases:

- Repaso del Lenguaje Visual Basic.
- Estudio teórico del método Sulzberger.
- Diseño de la aplicación.
- Programación.
- Comprobación y corrección de errores.

5.1. Repaso del Lenguaje Visual Basic. ^[3]

El primer paso fue realizar un repaso de la teoría de programación. El profesor Víctor Julián Hernández sugirió la utilización de Visual Basic para la realización de la aplicación, y esta fue la decisión adoptada finalmente ya que era un lenguaje conocido y que respondía a las necesidades de la aplicación. El repaso se realizó a través de diversas webs de internet, así como manuales de uso de Visual Basic y tuvo un proceso práctico con la realización de diferentes ejercicios.

5.2. Estudio del método Sulzberger.

La segunda fase del proyecto, una vez adquiridos los conocimientos necesarios de programación, fue el estudio de la teoría del método de Sulzberger visto en el apartado 3 de esta memoria. Estos conocimientos son básicos para poder continuar con el proyecto y que todo funcione correctamente.

5.3. Diseño de la aplicación.

Después de realizar el aprendizaje de los conceptos teóricos que se necesitan para la realización de este proyecto, comenzó la fase de diseño. El primer diseño fue un diseño simplificado, sin tener en cuenta los ejes cartesianos, ni todas las hipótesis de cálculo necesarias, y tampoco todas las acciones que influyen en un equipo eléctrico. Fue un diseño de toma de contacto que no cumplía con la realidad del problema que nos plantea una cimentación de un equipo eléctrico. Como se puede ver en la Imagen 20 era un diseño muy simplificado pero ya se empezaban a ver trazas de lo que iba a ser el resultado final de la aplicación.

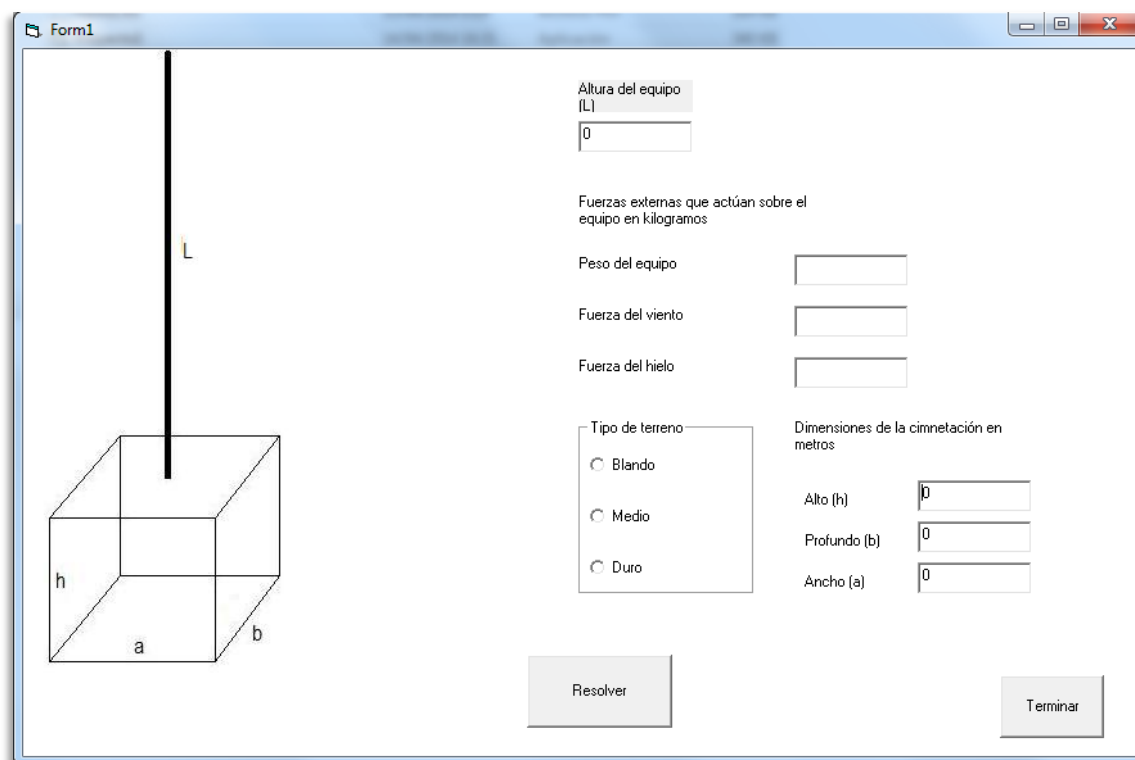
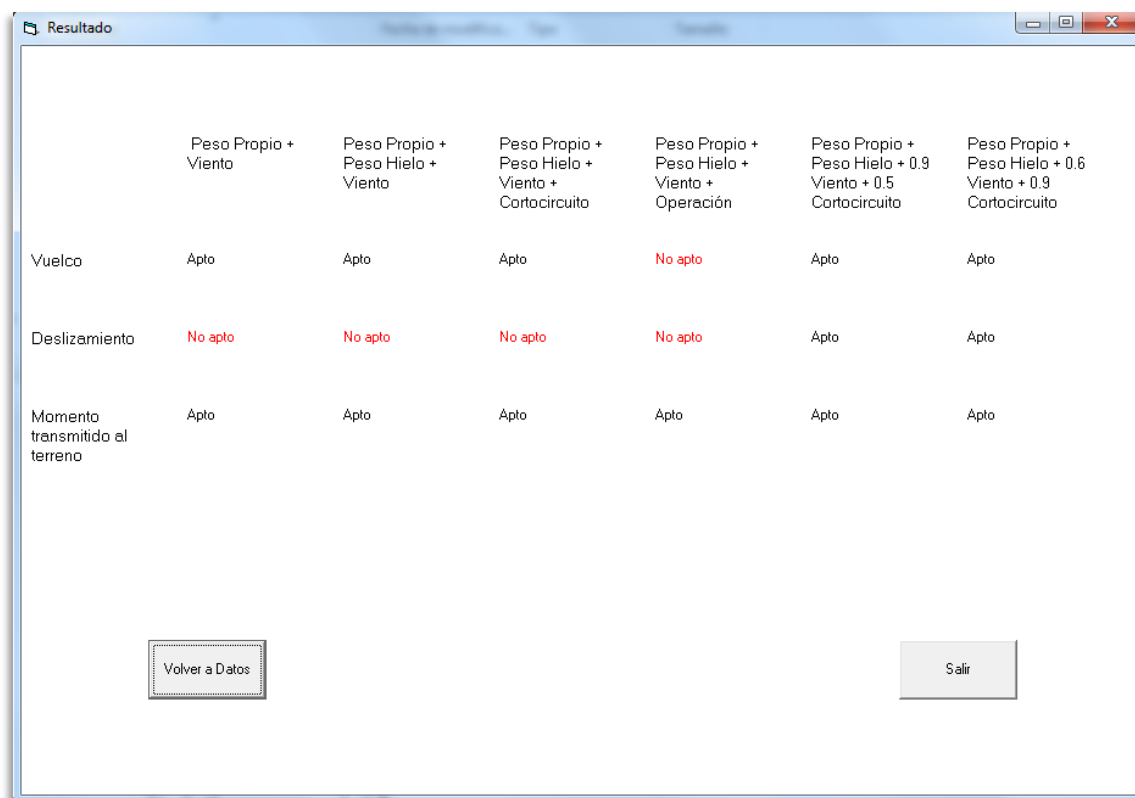


Imagen 20. Diseño básico inicial de la aplicación.

Tras una reunión con el tutor, se realizó un diseño más completo de la aplicación, teniendo en cuenta ya los ejes cartesianos, las hipótesis de cálculo y todas las acciones que influyen en el cálculo de una cimentación de apartamentada. En este diseño ya se introdujo el segundo formulario (Formulario de resultado) así como el botón “Borrar datos” y las cajas de texto necesarias para introducir un mayor número de datos reales del problema.



	Peso Propio + Viento	Peso Propio + Peso Hielo + Viento	Peso Propio + Peso Hielo + Viento + Cortocircuito	Peso Propio + Peso Hielo + Viento + Operación	Peso Propio + Peso Hielo + 0.9 Viento + 0.5 Cortocircuito	Peso Propio + Peso Hielo + 0.6 Viento + 0.9 Cortocircuito
Vuelco	Apto	Apto	Apto	No apto	Apto	Apto
Deslizamiento	No apto	No apto	No apto	No apto	Apto	Apto
Momento transmitido al terreno	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto

Volver a Datos

Salir

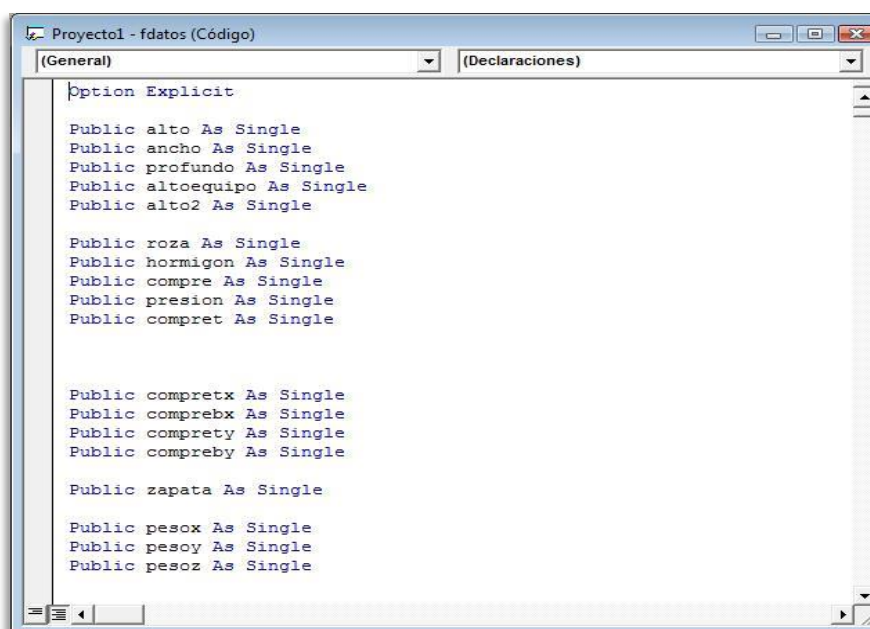
Imagen 21. Diseño inicial de formulario resultado.

Como vemos en la imagen 21 este tampoco es el resultado definitivo, ya que aún habría que añadirle algo que diese una información más concreta de la validez, o no, de la cimentación.

El diseño definitivo surgió tras otra reunión con el tutor del Trabajo Fin de Grado. Era necesario introducir un mayor número de datos y fuerzas para que el usuario pudiese realizar una comprobación más ajustada. Se introdujeron los datos del terreno y del hormigón, mayor número de fuerzas y la posibilidad de poner coeficientes determinados para cada fuerza. De este modo los datos de entrada llegaron hasta la cifra de noventa y ocho datos. Del mismo modo, se ampliaron de forma muy considerable los datos de salida, llegando a ciento cincuenta salidas. Esto se puede apreciar en las imágenes 6 y 7.

5.4. Programación.

Con el diseño definitivo de la aplicación ya realizado, lo siguiente era empezar a trabajar en la aplicación, era el momento de programar. Esta fase es la más delicada del proyecto, ya que el más mínimo error de programación puede dar al traste con el trabajo de horas. Esta fase consiste en darle a la aplicación las herramientas necesarias para que resuelva el problema. En este caso nuestro programa debe ser capaz de, a raíz de unos datos de entrada, realizar los cálculos y dar una salida al usuario. Los datos de entrada son los datos de las fuerzas, dimensiones del equipo y datos del terreno y hormigón. Los datos de salida es el resultado final que nos muestra la aplicación, y son los valores de las tablas del formulario de resultados. Esto se consigue introduciendo las ecuaciones matemáticas del método de cálculo de cimentaciones de modo que el programa sea capaz de interpretar, calcular y comparar los datos necesarios para el obtener el resultado adecuado.



```
Option Explicit

Public alto As Single
Public ancho As Single
Public profundo As Single
Public altoequipo As Single
Public alto2 As Single

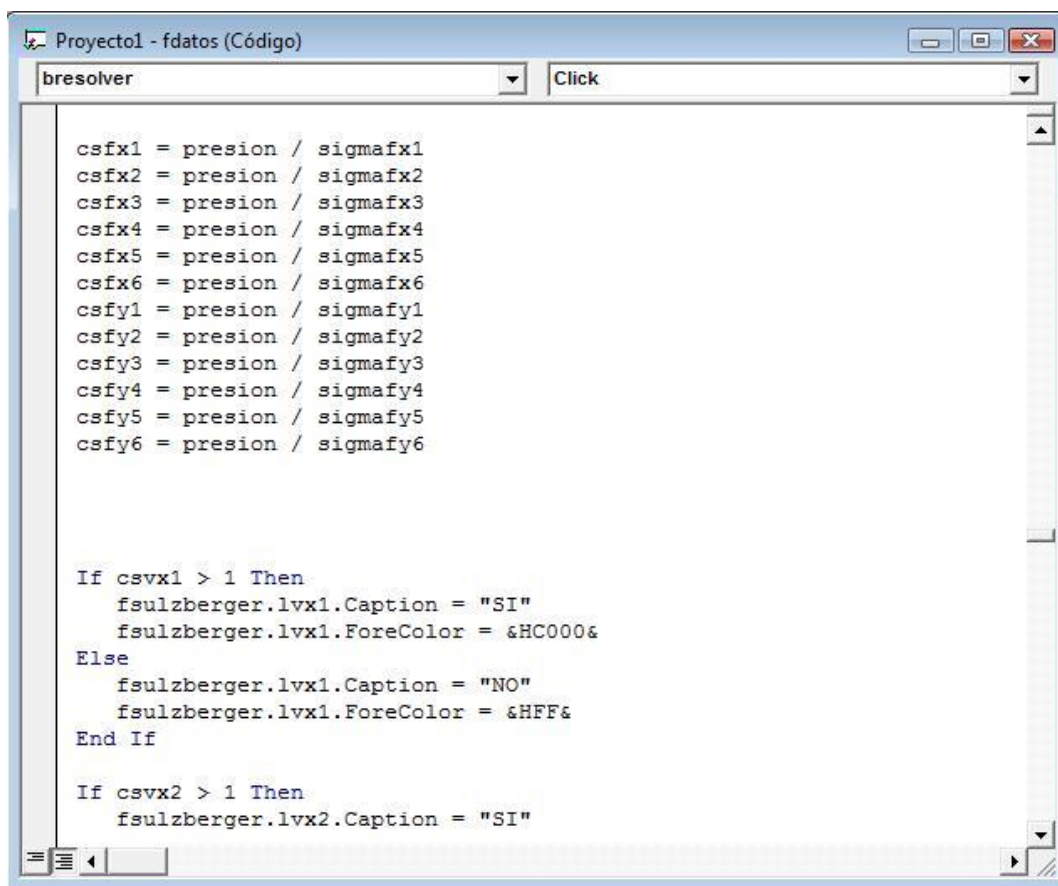
Public roza As Single
Public hormigon As Single
Public compre As Single
Public presion As Single
Public compret As Single

Public compretx As Single
Public comprebx As Single
Public comprety As Single
Public comprebby As Single

Public zapata As Single

Public pesox As Single
Public pesoy As Single
Public pesosz As Single
```

Imagen 22. Ejemplo de declaración de variables.



```
Project1 - fdatos (Código)
resolver Click

csfx1 = presion / sigmafx1
csfx2 = presion / sigmafx2
csfx3 = presion / sigmafx3
csfx4 = presion / sigmafx4
csfx5 = presion / sigmafx5
csfx6 = presion / sigmafx6
csfy1 = presion / sigmafy1
csfy2 = presion / sigmafy2
csfy3 = presion / sigmafy3
csfy4 = presion / sigmafy4
csfy5 = presion / sigmafy5
csfy6 = presion / sigmafy6

If csvx1 > 1 Then
    fsulzberger.lv1.Caption = "SI"
    fsulzberger.lv1.ForeColor = &HC000&
Else
    fsulzberger.lv1.Caption = "NO"
    fsulzberger.lv1.ForeColor = &HFF&
End If

If csvx2 > 1 Then
    fsulzberger.lv2.Caption = "SI"
```

Imagen 23. Ejemplo de código de cálculo de coeficientes de seguridad.

5.5. Comprobación y corrección de errores.

La última fase del proyecto consistió en el repaso de todo el código de la aplicación, para encontrar posibles errores y optimizar los recursos que utiliza la aplicación de forma que el resultado obtenido sea el correcto, así como la comprobación práctica de los resultados obtenidos mediante un ejercicio de validación.

6. Presupuesto.

En este apartado vamos a desglosar detalladamente las actividades, equipo, licencias y personal necesario para la realización de la aplicación informática de cálculo de cimentaciones por el método de Sulzberger. El desglose de costes se divide en dos grupos principales:

- Gastos informáticos. Este grupo incluye las licencias de software necesarias para la realización del proyecto en este caso Visual Studio (Amortización 2/10) y Microsoft Office, gastos de equipos informáticos utilizados, todos ellos en propiedad (Amortización 2/10), y gastos de impresión de documentación.
- Personal necesario. Estimación del coste del personal que ha participado en el proyecto. En este caso como ingeniero sénior el tutor del proyecto Victor Julián Hernández, y como ingeniero junior, el autor, Ekaitz Echevarría.

6.1. Gastos informáticos.

- Ordenador Acer TC-605	140 €
- Impresora láser Color HP LaserJet CP1025	26 €
- Papel	5 €
- Licencia Microsoft Office 2013	54 €
- Licencia Microsoft Visual Studio 2013	130 €
- Total	355 €

6.2. Mano de obra.

Formación y documentación 60 €/hora

- 90 horas	5400 €
------------	--------

Programación 40 €/hora

- 80 horas	3200 €
------------	--------

Redacción 25 €/hora

- 60 horas	1500€
------------	-------

- Total €	10100 €
------------------	----------------

6.3. Presupuesto final.

El presupuesto total de la aplicación asciende a **10455 €**.

Presupuesto cerrado a 04 de Septiembre de 2014.

El ingeniero Projectista.

Fdo.

Ekaitz Echevarría Cuesta

7. Bibliografía.

- [2] Tadeo Maciejewski. *Cálculo de fundaciones para líneas de transmisión de energía eléctrica con el método de Sulzberger*. Revista Electrotécnica [marzo-abril 1964]
- [3] Javier García de Jalón, José Ignacio Rodríguez , Alfonso Brazález *Aprenda Visual Basic 6.0*. Universidad de Navarra [agosto 1999]
- **Páginas web consultadas:**
 - [1] http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-transporte-de-electricidad/xvi.-las-subestaciones-electricas

<http://es.slideshare.net/pepito3101/subestaciones-electricas-24927998>

<http://es.slideshare.net/jandrogc/ud1-redes-de-distribucion-subestaciones?related=1>
 - https://www.youtube.com/watch?v=zFQvI_hVLZI
 - <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/>
 - <http://www.cicchiuhuahua.org/descargas/metodo-sulzberger.pdf>
 - http://opex-nergy.com/termosolares/sistemas_electricos_termosolar.html.
 - <http://www.panoramio.com>

- www.directindustry.es
- <http://www.aulaclie.es/visualbasic/>
- http://www.ingenioa.es/resources/C3%A1culo+y+Dise%C3%B1o+de+Cimentaciones+Semiprofundas_Publicaci%C3%B3n_2013.pdf

- **Imágenes:**

- [1]
http://www.endesa.com/es/conoceendesa/lineasnegocio/Electricidad/Red_Transporte
- [2] www.asturwatt.net
- [3] <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/galeria-de-imagenes/instalaciones-subestaciones>
- [4]
http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com.es/2011/09/seccionadore-s-en-at-en-estaciones_30.html
- [5] www.siemens.com